

文章编号:1004-4213(2010)09-1543-4

光溅射镀膜均匀性的优化模拟*

王晟,叶景峰,刘晶儒,白婷,叶锡生,王立君

(西北核技术研究所,西安 710024)

摘要:为了改善脉冲激光溅射沉积大面积薄膜的均匀性,发展了基片离轴旋转的扫描技术.根据基片离轴旋转的基本原理和等离子体羽空间余弦分布规律,建立了径向膜厚分布公式.数值模拟了各种因素对基片离轴旋转扫描沉积薄膜均匀性的影响.分析表明,优化粒子束中心与基片中心偏置距离、溅射点与基片的距离是改善基片离轴旋转扫描镀膜均匀性的主要途径.同时也考虑了电机转速、镀膜时间和激光重频的影响.通过参量优化,当均匀度要求在 95% 时,计算得到薄膜的最大半径超过 40 mm.

关键词:薄膜;基片离轴旋转扫描;均匀性;脉冲激光镀膜

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103909.1543

0 引言

利用脉冲激光沉积(Pulse Laser Deposition, PLD)技术^[1-3]制备类金刚石(Diamond-Like Carbon, DLC)薄膜有其独特的优势,比如激光与靶材耦合效率高、对多元化合物没有择优蒸发效应、蒸发粒子能量大、易于控制等.在脉冲激光烧蚀靶材的过程中,蒸发粒子束空间分布服从余弦规律.对于这种类型的蒸发源,当基片台相对于溅射源固定不动时,在基片上沉积的薄膜厚度分布不均匀^[4].沉积的薄膜中心较厚,边缘较薄,薄膜均匀性较差.常用的解决方法是采用基片平动扫描^[5],但这种方法受真空镀膜室尺寸的制约,基片平动范围难以完全覆盖粒子束区域,造成薄膜均匀性不是很高.另外,基片平动的方式实际上是通过牺牲大量的蒸发粒子而换取大尺寸薄膜的均匀性,降低了薄膜的沉积效率.

针对基片平动扫描方式的缺点,发展了一种离轴旋转^[6]的基片扫描方式.这种方式基片始终位于溅射粒子束的区域内,能够充分利用溅射粒子,并且能够得到大尺寸均匀薄膜,有效克服平动扫描的缺点.本文数值模拟了各种因素对基片离轴旋转扫描沉积薄膜均匀性的影响.针对影响镀膜均匀性的偏置距离、溅射距离以及其它因素开展了数值模拟,并进行了分析优化.

1 基本原理

基片离轴旋转扫描技术的原理如图 1(a),基片台置于激光溅射的粒子束区域内,并以一定的角速

度旋转.与常用扫描不同,基片台中心 O 与粒子束中心 A 有一定的偏置距离 r .通过偏置,基片的边缘 C 接收位于离粒子束中心 A 较近的粒子,基片中心 O 接收位于粒子束边缘的粒子,如图 1(b)所示的基片俯视图.虽然基片中心 O 接收的粒子分布少,但在基片旋转过程中, O 点一直在等离子体羽内,沉积时间长,而 C 点只有少部分时间溅射到等离子体羽,适当调整偏置距离 r 的大小,保证 O 点和 C 点接收到的粒子数相同.

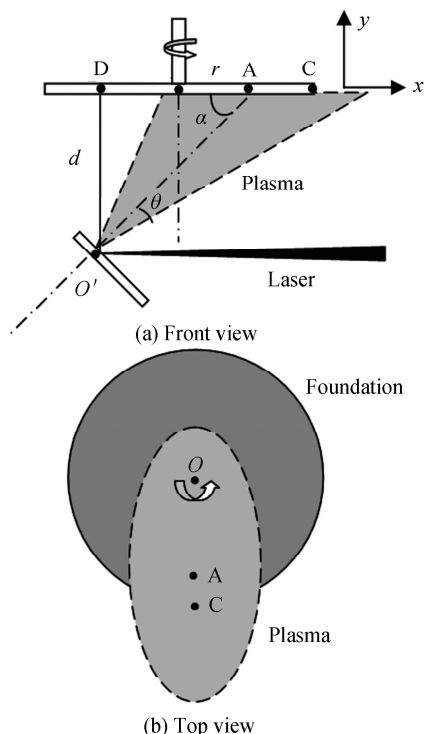


图 1 基片离轴旋转扫描方式的原理示意图
Fig. 1 Working principle of off-axis rotated scan

粒子束空间分布服从函数 $f(\theta) = \cos^n(\theta)$,其中 θ 为相对于靶面外法线的夹角, n 为经验取值,经验

* 国家高技术研究发展计划 804 主题军口资助

Tel:029-84765176

Email:pplunum1@163.com

收稿日期:2009-10-28

修回日期:2010-04-21

的 n 取值为 4~13 [7], 本文的计算中取值为 10. 经推导, 在基片平面内以基片中心 O 为极点的极坐标系中, 粒子束分布的归一化函数为

$$f(\rho, \varphi) = \frac{\cos^n(\theta) = \frac{(d/\sin \alpha - \cos \alpha(r - \rho \cos \varphi))}{\sqrt{d^2 + \rho^2 \sin^2 \varphi + (d \cos \alpha / \sin \alpha - r + \rho \cos^2 \varphi)}} \quad (1)$$

式中, r 为基片中心偏离粒子束中心距离, d 为靶面溅射点与基片之间的距离, α 为粒子束中心轴线与基片夹角(数值模拟时取值为 45°).

考虑到激光是脉冲重频工作的, 激光溅射的等离子体也是脉冲间歇式的, 所以在数值模拟时, 还要加入等离子体持续时间、电动机转速、镀膜时间和激光重频这几个因素. 假设激光重频为 f , 基片台以角速度 ω 旋转, 等离子体溅射持续时间 Δt , 粒子在基片上的沉积率为常量 η , 则旋转一周时沉积在基片上径向距离为 ρ 上一点的粒子数(对应于该处沉积薄膜厚度)为

$$N(\rho) = \eta \sum_{i=0}^{2\pi f / \omega \Delta t + i / f} \int_{i\omega / f}^{(i+1)\omega / f} \{ [d/\sin \alpha - \cos \alpha(r - \rho \cos \varphi)] / \sqrt{d^2 + \rho^2 \sin^2 \varphi + (d \cos \alpha / \sin \alpha - r + \rho \cos^2 \varphi)} \} d\varphi \quad (2)$$

2 数值模拟及分析优化

2.1 粒子束中心与基片中心偏移距离 r 的影响

固定溅射点与基片的距离, 只分析 r 对薄膜均匀性的影响. 式(2)中, 设定 $d = 50$ mm, $f = 1$ Hz, $\Delta t = 10$ ms, 电机转速为 1 r/min, 镀膜时间为 1 min, r 从 20~38 mm 变化时, 数值模拟的结果如图 2. 从图 2 中可以看出, 在 $r = 36$ mm 处, 均匀性达到 95%, 得到薄膜的最大尺寸超过 40 mm. 而当 r 过小或过大时, 薄膜均匀性都会变差. 从图 2 还可以看出, 当 r 从 32~36 mm 变化时, 均匀性达到 95% 的薄膜半径都超过 20 mm, 这说明离轴旋转扫描方式对于离轴位置的误差有一定冗余度的. 模拟结果表明, 针对固定溅射点与基片的距离, r 值的选取存在一个最优化值.

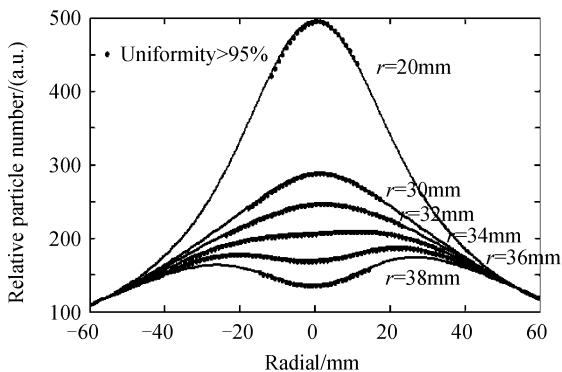


图 2 r 对薄膜均匀性的影响
Fig. 2 Effects of r on uniformity of the film

2.2 溅射点与基片的距离 d 的影响

改变溅射点与基片的距离 d , r 采用针对不同 d 的优化值, 分析 d 对薄膜均匀性的影响. 根据式(2), d 从 40~60 mm 变化, 数值模拟的结果如图 3. 从图 3 可以看出, 当 r 为最优化时, 随着距离 d 的增加, 薄膜均匀性的尺寸是在增加的. 但由于激光溅射的等离子体羽长度有限, 考虑到沉积速率, d 值不能过大, 否则基片接收不到等离子体.

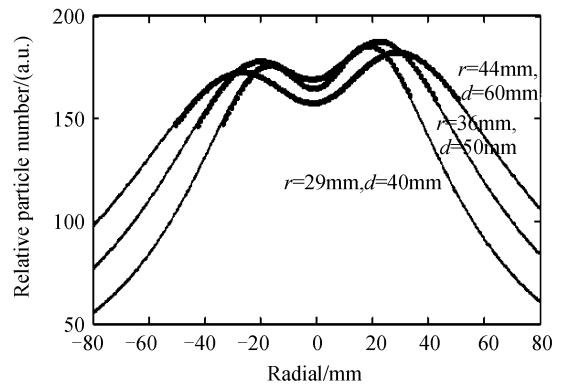


图 3 d 对薄膜均匀性的影响
Fig. 3 Effects of d on uniformity of the film

2.3 电机转速的影响

由于等离子体是脉冲间歇的, 每次持续时间一般在 ms 量级, 电机转速要达到几万转, 才能在一个等离子体脉冲持续时间内, 基片上所有点都接受到等离子体. 事实上, 电机在低转速情况下, 也能满足均匀性要求, 只要避免转速与激光重频周期重复, 造成基片上的每一点始终接收到相同位置的等离子体. 图 4 为电机不同转速的模拟结果, 其中, $d = 50$ mm, $r = 34$ mm, 激光重频为 1 Hz, 镀膜时间为 1 min. 从图 4 可以看出, 当转速为 20、30、40、60、80 和 90 r/min 时, 即为 20、30 的倍数时, 出现周期重复沉积, 薄膜均匀性变差, 特别为 60 的倍数, 薄膜的均匀性最差. 当电机转速避开这些值时, 沉积薄膜的均匀性得到了改善.

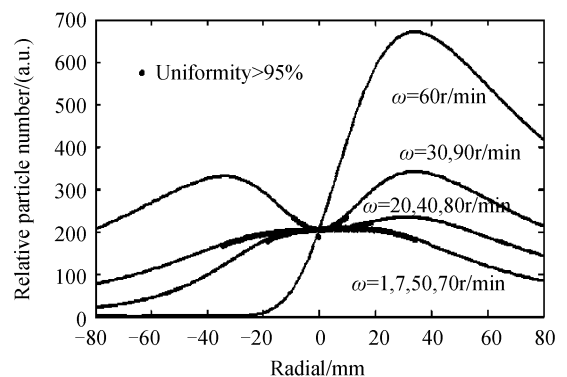


图 4 电机转速对薄膜均匀性的影响
Fig. 4 Effects of electromotor rotate speed on uniformity of the film

2.4 镀膜时间的影响

当激光重频为 1 Hz, 其它最优化时, 镀膜时间

对基片上沉积薄膜的均匀性影响如图 5。从图 5 中可以看出,镀膜均匀性随镀膜时间出现周期变化。在镀膜时间为 30 s 的整数倍时,镀膜的均匀性最好,即在薄膜在完整的旋转周期内,均匀性得到了改善。但实际镀膜时,镀膜时间总会存在偏差。模拟发现,增加镀膜时间可以减小这种时间偏差对薄膜均匀性的影响。图 6 为镀膜时间 590~610 s 的模拟结果。从图 6 可以看出,随着镀膜时间的增加,时间偏差对薄膜均匀性的影响在减小,这与认识基本吻合。

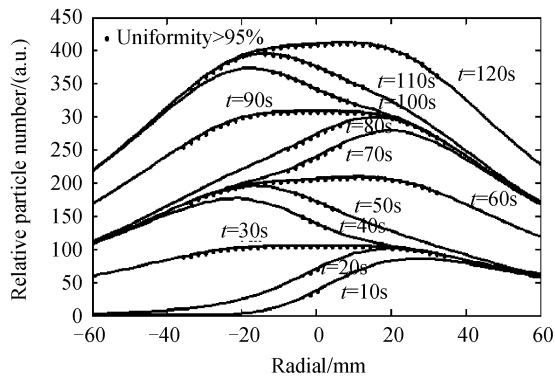


图 5 镀膜时间对薄膜均匀性的影响

Fig. 5 Effects of deposition time on uniformity of the film

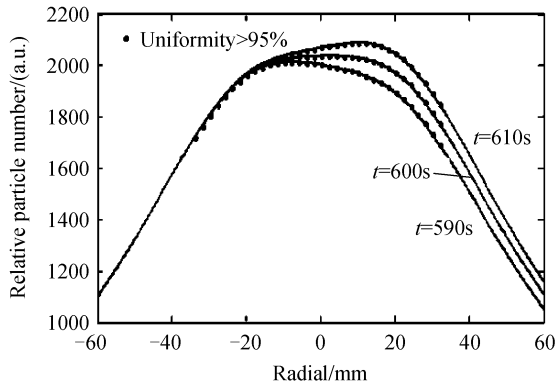


图 6 长时间对均匀性的影响

Fig. 6 Time deviation's effects on uniformity for long time

2.5 激光重频的影响

激光重频的增加,会缩短等离子体羽间歇时间,提高沉积速率。图 7 为电机转速为 1 r/min,镀膜

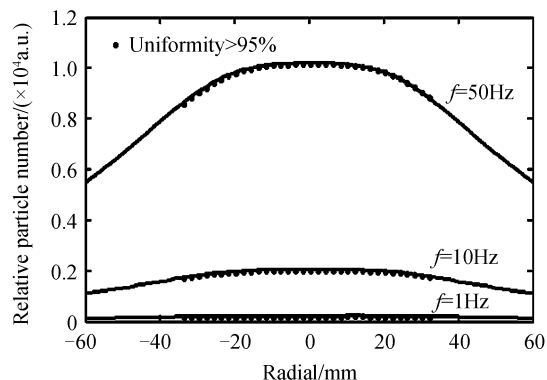


图 7 重频对薄膜均匀性的影响

Fig. 7 Effects of repetition frequency on uniformity of the film

1 min,激光重频从 1~50 Hz 变化时的数值模拟结果。从图 7 可以看出,随着激光重频增加,薄膜均匀性没有变化。

3 结论

依据离轴旋转扫描镀膜的原理和等离子体羽空间余弦分布规律,数值模拟了各种参量对薄膜均匀性的影响。分析表明:优化粒子束中心与基片中心偏置距离、溅射点与基片的距离是改善基片离轴旋转扫描镀膜均匀性的主要途径,针对不同的溅射点与基片的距离,偏置距离存在优化值;合适的增加溅射点与基片的距离,可增加薄膜均匀性的尺寸。电机转速和镀膜时间也对镀膜均匀性产生影响,电机在低转速情况下,应避免与激光重频发生周期重复;增加镀膜时间可以减小时间偏差对薄膜均匀性的影响。通过参量优化,当均匀度要求在 95% 时,计算得到薄膜的最大半径超过 40 mm。这些结论,对脉冲激光溅射沉积大面积薄膜材料提供了指导。

参考文献

- [1] LIU Jing-ru, BAI Ting, LI Tie-jun, *et al.* Study on pulsed excimer laser deposited films [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(5): 646-650.
刘晶儒,白婷,李铁军,等.脉冲准分子激光沉积薄膜的实验研究[J].*强激光与粒子束*, 2002, **14**(5): 646-650.
- [2] YAO Dong-sheng, LIU Jing-ru, WANG Li-ge, *et al.* Deposition of DLC film by ultrashort pulsed excimer laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2): 270-276.
姚东升,刘晶儒,王丽戈,等.超短脉冲准分子激光沉积类金刚石薄膜的实验研究[J].*光学学报*, 1999, **19**(2): 270-276.
- [3] BAI Ting, YE Jing-feng, LIU Jing-ru, *et al.* Pulsed excimer laser deposited diamond like carbon film on ZnS with wide-spectral transmission[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2007, **34**(7): 992-997.
白婷,叶景峰,刘晶儒,等.利用脉冲准分子激光在 ZnS 上沉积类金刚石薄膜[J].*中国激光*, 2007, **34**(7): 992-997.
- [4] LI Tie-jun, LIU Jing-ru, WANG Li-ge, *et al.* Pulsed laser deposition of DLC films over large area and it's uniformity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(5): 1080-1085.
李铁军,刘晶儒,王丽戈,等.利用脉冲激基分子激光制备大尺寸类金刚石薄膜及其均匀性分析[J].*光子学报*, 1999, **28**(5): 1080-1085.
- [5] GREER J A. Comparison of large area pulsed-laser deposition approaches[C]. *SPIE*, 1992, **1835**: 21-30.
- [6] CHEUNG J T, HORWITZ J. Pulsed laser deposition history and laser target interactions[J]. *MRS Bulletin*, 1992, **17**(2): 30-36.
- [7] SUN Yi-ning, GUO Wan-tu, LI Jing-qi, *et al.* New progress of diamond films in aerospace application[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1997, **17**(3): 27-38.
孙亦宁,郭晚土,李敬起,等.金刚石膜在宇航应用中的新进展[J].*中国空间科学技术*, 1997, **17**(3): 27-38.

Optimal Simulation for the Thickness Uniformity of the Film Deposited by Pulse Laser Sputtering

WANG Sheng, YE Jing-feng, LIU Jing-ru, BAI Ting, YE Xi-sheng, WANG Li-jun
(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Method of off-axis rotated scan is studied in order to improve the thickness uniformity of the film by pulse laser deposition (PLD). Based on the principle and spatial distribution of plasma, radial distribution formula of film thickness is formed. Effects on uniformity of film deposited by method of off-axis rotated scan are simulated numerically. The simulated results show that optimize of d (distance between sputtering dot and foundation) and r (interval between particle center and foundation center) are primary means for improving the uniformity of film. In addition, influence of electromotor rotate speed, working time and laser repetition frequency is considered. Simulated with optimal parameters, maximum radius of film diameter over 40 mm is obtained when 95% uniformity is required.

Key words: Film; Off-axis rotated scan; Uniformity; Pulse laser deposition(PLD)



WANG Sheng was born in 1977. He received the M. S. degree from Northwest Institute of Nuclear Technology. Now he is an engineer, and his research interests focus on laser technology and applications.